

М. П. Пузанов^{*}, С. И. Степанов

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
г. Екатеринбург

^{*} *puzanovmp@yandex.ru*

Научный руководитель – проф., д-р техн. наук *Ю. Н. Логинов*

ИССЛЕДОВАНИЕ АНИЗОТРОПИИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТРАНСФОРМАТОРНОЙ СТАЛИ В ХОЛОДНОКАТАНОМ СОСТОЯНИИ

В настоящей работе было проведено испытание на растяжение образцов сплава Fe–3%Si в состоянии после холодной прокатки. Испытания проводили в трёх направлениях: направление прокатки, поперечное и диагональное (45° относительно направления прокатки). Было обнаружено, что величина временного сопротивления в направлении прокатки на 5 % меньше, чем в поперечном направлении.

Ключевые слова: анизотропия, сплав Fe-3%Si, механические свойства.

M. P. Puzanov, S. I. Stepanov

MECHANICAL PROPERTIES ANISOTROPY RESEARCH OF COLD ROLLED TRANSFORMER STEEL

Tensile tests of Fe–3%Si alloy cold rolled samples were carried out in this paper. There were three orientations of samples for tensile tests: rolling direction, transverse direction and diagonal direction (45° to rolling direction). It was discovered that ultimate strength value in rolling direction is less than transverse direction by 5 %.

Keywords: anisotropy, Fe–3%Si alloy, mechanical properties.

В процессах обработки металлов давлением образование в деформируемом материале кристаллографической текстуры является широко распространённым явлением. Наличие в металлах и сплавах текстуры в значительной мере определяет анизотропию их механических свойств, существенно затрудняя процесс обработки. Особенно это актуально для процесса холодной прокатки, поскольку вызванная текстурой анизотропия механических свойств может существенно влиять на свойства проката после термической обработки [1–3]. Исследованию механической анизотропии металлических сплавов в холоднокатаном состоянии посвящено множество работ. В них оценка анизотропии проката выполняется по результатам механических испытаний в трёх направлениях: 0°, 45° и 90° относительно направления прокатки. Так, в работе [4] показано, что при испытании на сжатие титановых сплавов

Grade 1 и Grade 2 напряжение пластического течения в направлении, поперечном направлению прокатки, в среднем на 15 % превышает аналогичную величину в направлении прокатки и в диагональном направлении.

Электротехническая анизотропная сталь (ЭАС, трансформаторная сталь, сплав Fe-3%Si) – это листовая, холоднокатаная, кремнистая сталь, обладающая уникальными магнитными свойствами вдоль направления прокатки, которые обусловлены наличием в ней ребровой текстуры вторичной рекристаллизации $\{110\}<001>$. Данный материал главным образом используется в производстве магнитопроводов силовых трансформаторов, поэтому качество данного материала во многом определяет эффективность функционирования энергетической отрасли в целом. Одним из перспективных методов снижения магнитных потерь в ЭАС является уменьшение толщины проката. В настоящее время ведущие фирмы-производители способны серийно выпускать ЭАС толщиной 0,23 мм с магнитными потерями $P_{1.7/50} < 0,77$ Вт/кг. В работах [5, 6] отмечено, что является перспективным создание технологии производства ЭАС толщиной 0,15–0,18 мм, что позволит снизить магнитные потери до $P_{1.7/50} \leq 0,35$ Вт/кг. В июне 2016 г. основными мировыми производителями трансформаторной стали в рамках 7-ой Международной конференции «Magnetism and Metallurgy» отмечалось, что планомерное ужесточение требований по энергоэффективности трансформаторов в странах ЕС и Китае делает целесообразным проведение научно-промышленных работ, направленных на дальнейшее утонение сортамента трансформаторной стали с целью минимизации её электромагнитных потерь.

В работе [7] указывается, что большинство зёрен электротехнической кремнистой стали после холодной прокатки на конечную толщину с суммарным обжатием 57,4 % имеет неострую текстуру α -волокна, в поверхностных слоях присутствует октаэдрическая ориентировка $\{111\}<112>$. Очевидно, что при формировании текстуры в процессе холодной прокатки в стальном листе развивается и анизотропия механических свойств, которую необходимо учитывать при анализе напряжённо-деформированного состояния в очаге деформации. Целесообразность этого очевидна для проектирования технологии производства ЭАС толщиной 0,15–0,18 мм, когда возрастающая с обжатием анизотропия механических свойств может заметно снижать обрабатываемость сталей на прокатных переделах [8], что особенно актуально для малопластичной кремнистых сталей.

Цель настоящей работы – установление характера анизотропии механических свойств кремнистой, электротехнической стали в холоднокатаном состоянии.

В качестве исследуемого материала использовали листы сплава Fe-3%Si. Листы кремнистой стали были прокатаны на стане кварто в

холодном состоянии с толщины 0,70 мм до 0,26 мм с суммарным обжатием 62,9 %. Прокатку осуществляли со смазкой, для чего использовали водно-масляную эмульсию. Реализованная в эксперименте степень суммарного обжатия сплава соответствует уровню деформации и анизотропии, накопленным полосой кремнистой стали к последнему проходу при прокатке на конечную толщину металла тонкого сортамента (0,15–0,18 мм). Из холоднокатаных листов для испытаний на растяжение были подготовлены плоские образцы, ориентированные под углом 0° 45° и 90° относительно направления прокатки. Образцы имели ширину 30 мм и длину рабочей части 240 мм. Перед растяжением образцы были обезжирены с использованием водно-щелочного раствора и спирта. Для каждой ориентации относительно направления прокатки проводили по 3 испытания согласно ГОСТ 1497–84. Растяжение образцов выполняли на растяжной машине «2161 Р-5», скорость деформации при испытаниях составила 0,00125 с⁻¹.

В ходе испытаний было установлено, что участок пластической деформации на исследуемом материале практически отсутствует, что объясняется исчерпанием запаса пластичности вследствие значительного деформационного упрочнения полученного в ходе холодной прокатки. Для оценки анизотропии механических свойств материала измеряли величину временного сопротивления (предела прочности) σ_b . Результаты испытаний представлены в таблице.

Таблица

Результаты испытаний на растяжение

№ образца	Ориентация образца	σ_b , МПа
1	0°	1000
2	0°	957
3	0°	1032
Среднее	0°	996
4	45°	1008
5	45°	1051
6	45°	958
Среднее	45°	1006
7	90°	1082
8	90°	1069
9	90°	990
Среднее	90°	1047

Из таблицы видно, что величина временного сопротивления холоднокатаной трансформаторной стали различна в зависимости от ориентации образца. По данным таблицы построена диаграмма,

отражающая зависимость временного сопротивления холоднокатаной трансформаторной стали от направления в плоскости листа. Диаграмма представлена на рисунке.

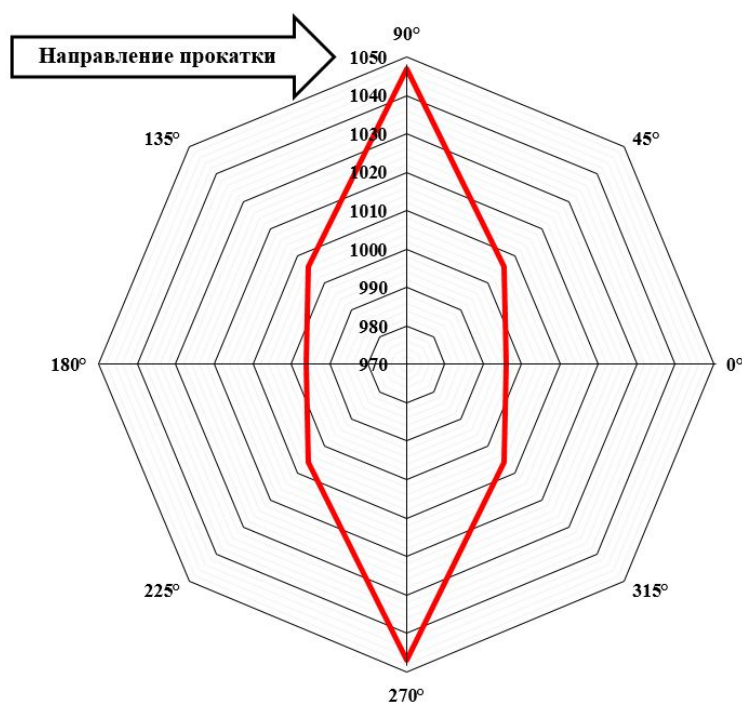


Рис. Временное сопротивление холоднокатаной трансформаторной стали в различных направлениях

Как видно из рисунка величина временного сопротивления холоднокатаной трансформаторной стали в направлении прокатки и в диагональном направлении практически одинакова. В поперечном направлении величина временного сопротивления в среднем на 5 % больше, чем в направлении прокатки. Таким образом, результаты испытаний показывают, что при холодной прокатке трансформаторной стали упрочнение в плоскости листа происходит неоднородно, что можно объяснить образованием в металле кристаллографической текстуры деформации.

В настоящей работе показано, что во время холодной прокатки в плоскости листа трансформаторной стали развивается значимая анизотропия механических свойств. Наибольшему деформационному упрочнению металл подвергается в поперечном направлении относительно направления прокатки, что может быть объяснено развитием в прокатываемом листе текстуры деформации. Установленную анизотропию механических свойств необходимо учитывать при анализе напряжённо-деформированного состояния в очаге деформации для оптимизации существующих и создания новых технологических режимов обработки данной стали в промышленных условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Influence of heat treatment on the microstructure, texture and formability of 2024 aluminium alloy / C. K. S. Moy [et al.] // Materials Science and Engineering: A. 2012. V. 552. P. 48–60.
2. Recrystallization texture of cold rolled and annealed IF steel produced from ferritic rolled hot strip / A. Elsner [et al.] // Materials Science Forum. 2004. V. 467–470. № 1. P. 257–262.
3. Microstructures and properties of Al–Mg–Sc aluminum alloy sheet at different orientations / Q. Chen [et al.] // Journal of Central South University (Science and Technology). 2013. V. 44. № 3. P. 921–929.
4. Anisotropic deformation behavior under various strain paths in commercially pure titanium Grade 1 and Grade 2 sheets / N. Yi [et al.] // Materials Science and Engineering: A. 2016. V. 655. P. 70–85.
5. Kubota T. Recent progress and future trend on grain-oriented silicon steel / T. Kubota, M. Fujikura, Y. Ushigami // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2000. V. 215–216. P. 69–73.
6. Xia Z. Developments in the production of grain-oriented electrical steel / Z. Xia, T. Kang, Q. Wang // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2008. V. 320. № 23. P. 3229–3323.
7. Кононов А. А. Распределение кристаллографических ориентировок в анизотропной электротехнической стали на прокатных переделах / А. А. Кононов, О. Г. Зотов, А. И. Шамшурин // МиТОМ. 2014. № 8. С. 49–53.
8. Effects of cold rolling on microstructure and mechanical properties of Fe–30Mn–3Si–4Al–0.093C TWIP steel / Y. F. Shen [et al.] // Materials Science and Engineering: A. 2013. V. 561. P. 329–337.